



Modelling Self-Heating in Compost Piles: Application of Reaction Engineering Approach

Shierin^{1*}, dan Aditya Putranto²

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, Program Pascasarjana, Universitas Katolik Parahyangan

Jalan Merdeka No. 30, Bandung, Telp: (022) – 4202351

²Jurusan Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan

Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung, Telp: (022) – 2032700

*E-mail: shierin25@gmail.com

adityaptr@yahoo.com

Abstract

Spontaneous combustion in compost piles is the main cause of fires at compost facilities or landfill sites. Hence, the increase in temperature in compost piles, known as self-heating phenomenon, has to be considered thoroughly for safety aspect at the facilities. One of the most reliable methods for estimating the safety aspect is modelling the self-heating in compost piles. In this study, a new model is proposed to better represent self-heating phenomenon. The proposed model incorporates simultaneous heat and mass transfer coupled with biological and chemical heat generations. For better accuracy of the modelling, the evaporation term implementing the Reaction Engineering Approach (REA) is used here to yield a set of heat and mass conservation which consists of mass balance of water vapor, liquid water, oxygen, and heat balance. The set of partial differential equations is solved using finite element solver Comsol Multiphysics to generate the spatial profiles of concentration of oxygen, water vapor, water liquid, and heat balance inside the compost piles. Benchmarks against the experimental data indicate that the results of the modelling match well with the experimental data. Therefore the proposed model can be implemented to predict safe storage of compost piles under various configurations.

Keywords: self-heating, compost pile, Reaction Engineering Approach (REA), modelling

Pendahuluan

Salah satu teknologi daur ulang limbah yang dapat diterapkan pada limbah organik yang berasal dari limbah perkotaan maupun industri adalah teknologi pengomposan. Epstein (2001) mendefinisikan pengomposan sebagai proses dekomposisi biologis dari material organik dalam kondisi aerobik. Proses pengomposan tersebut memerlukan pengontrolan dan pengaturan yang tepat, terutama pada proses pengomposan skala industri.

Teknologi pengomposan ini merupakan metode manajemen limbah yang lebih aman bagi lingkungan dibandingkan dengan pembakaran (*incineration*) ataupun pemanfaatan area penimbunan limbah padat (*landfill*). Meskipun demikian, aspek keamanan dari teknologi pengomposan ini seringkali terlupakan dan diabaikan.

Penumpukan limbah organik mengandung potensi bahaya yang besar apabila tidak dikontrol dengan baik dan benar. Tumpukan limbah yang akan dijadikan kompos (*compost piles*) tersebut dapat mengalami fenomena *self-heating* di mana temperatur di dalam tumpukan tersebut akan meningkat dengan sendirinya seiring dengan berjalannya waktu pengomposan. Fenomena ini dapat bermuara pada terjadinya *auto-ignition* yang menyebabkan kebakaran pada area pengomposan. Untuk material kompos, temperatur pembakaran berada di sekitar 150-200°C (Rynk, 2000).

Aspek keamanan dari *compost piles* perlu diestimasi secara akurat dengan melakukan pemodelan perpindahan massa dan panas yang terjadi pada *compost piles*. Model yang logis dan akurat diperlukan sehingga fenomena *self-heating* dapat diprediksi dan dikontrol dengan baik.

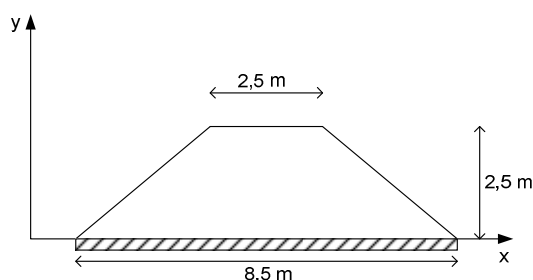
Model yang telah dikembangkan sebelumnya oleh Sidhu et. al. (Sidhu dkk., 2007) meliputi persamaan diferensial parsial untuk neraca massa oksigen dan neraca panas dua dimensi yang telah memperhitungkan generasi panas dari proses biologi maupun kimia. Untuk meningkatkan keakuratan dari pemodelan yang dilakukan, suku evaporasi perlu turut diperhitungkan mengingat pentingnya peran air (*moisture*) pada proses pengomposan. Dalam penelitian ini, *Reaction Engineering Approach* (REA) akan diterapkan sehingga pemodelan melibatkan sejumlah persamaan diferensial parsial meliputi neraca massa oksigen, uap air (*water vapor*), air (*water liquid*), dan neraca panas.



Metodologi

Tinjauan Detil Eksperimen

Validasi data yang dihasilkan melalui pemodelan dengan penambahan suku evaporasi menggunakan REA dilakukan dengan membandingkan data tersebut dengan data eksperimen yang dilakukan oleh Moraga dkk. (2009). Tumpukan kompos 3D dengan bentuk trapezium dengan tinggi 2,5 m, panjang 8,5 m dan lebar 7 m, serta bagian permukaan atas selebar 2,5 m dibangun dari lumpur limbah (*sewage sludge*) yang dihasilkan oleh tempat pengolahan air limbah perkotaan di Kota Santiago, Chile (El Trebal). Lumpur limbah tersebut diproduksi pada bulan Juli 2004 dan digunakan untuk membangun tumpukan kompos pada minggu ketiga bulan Februari 2005. Temperatur pada tumpukan kompos dicatat dengan menggunakan *thermocouple* tipe K (Ni-Cr) dengan panjang 0,1 m dan diameter 0,0015 m. *Thermocouple* ini terhubung dengan sistem akuisisi data LA/AI-A8 *Cole Parmer* yang terhubung dengan komputer yang dilengkapi *software InstaTrend* untuk mencatat data temperatur tiap 10 menit. Setiap minggunya data tersebut akan dirata-rata dan dialurkannya dalam bentuk grafik. Titik pengukuran temperatur adalah pada pusat tumpukan kompos pada kedalaman 2,15, 1,25, dan 0,4 m. Konfigurasi tumpukan kompos yang dibangun dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi tumpukan kompos

Tinjauan Reaction Engineering Approach (REA)

Reaction Engineering Approach (REA) merupakan hasil dari aplikasi teknik reaksi kimia untuk memodelkan kinetika pengeringan yang pertama kali diperkenalkan oleh X. D. Chen pada tahun 1996. REA telah diterapkan pada berbagai sistem pengeringan pangan (Putranto dkk., 2011) maupun non pangan serta terbukti dapat memodelkan dengan baik pengeringan lumpur limbah yang berlangsung secara konvektif (Putranto dan Chen, 2013). Menurut Putranto dan Chen (2013), REA memiliki keunggulan dibandingkan dengan *diffusion-based model* di mana modelnya lebih sederhana dan mampu menjelaskan dengan baik makna fisis dalam peristiwa pengeringan yang terjadi. Selain itu, jumlah eksperimen yang diperlukan untuk mendapatkan parameter yang diperlukan dalam pemodelan lebih sedikit dibandingkan model difusi biasa.

Rangkuman mengenai REA disajikan oleh Chen (2008) dan dijabarkan sebagai berikut. Laju pengeringan (berdasarkan neraca massa) suatu material secara umum:

$$m_s \frac{dX}{dt} = -h_m A (\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \quad (1)$$

$\rho_{v,s}$ (konsentrasi uap air pada permukaan) dapat dihubungkan dengan $\rho_{v, sat}(T)$ (konsentrasi uap air jenuh) berdasarkan persamaan (Chen and Xie, 1997; Chen, 2008):

$$\rho_{v,s} = \exp\left(\frac{-\Delta E_v}{RT}\right) \rho_{v, sat}(T) \quad (2)$$

$\rho_{v, sat}(T)$ untuk air dapat diestimasi dengan persamaan berikut (Keey, 1992):

$$\rho_{v, sat}(T) = 4,844 \times 10^{-3}(T - 273)^4 - 1,4807 \times 10^{-7}(T - 273)^3 + 2,6572 \times 10^{-5}(T - 273)^2 - 4,8613 \times 10^{-3}(T - 273) + 8,342 \times 10^{-3} \quad (3)$$

Dengan menggabungkan persamaan (1) dan (2) diperoleh persamaan berikut:

$$m_s \frac{dX}{dt} = -h_m A \left(\exp\left(\frac{-\Delta E_v}{RT}\right) \rho_{v, sat}(T) - \rho_{v,b} \right) \quad (4)$$

Persamaan (4) menggambarkan REA yang dirumuskan sebagai persamaan diferensial berorde satu terhadap waktu dan model tersebut menjadi inti dari *lumped-REA* (L-REA) yang tidak mengasumsikan kadar air seragam tetapi mengevaluasi kadar air rata-rata dari sampel selama pengeringan.

Dengan menyusun ulang persamaan (4) diperoleh persamaan:

$$\Delta E_v = -RT \ln \left[\frac{-m_s \frac{dX}{dt} h_m A + \rho_{v,b}}{\rho_{v, sat}(T)} \right] \quad (5)$$

ΔE_v (J.mol⁻¹) merupakan energi aktivasi yang mewakili besarnya hambatan untuk menghilangkan *free moisture content* dan nilainya bergantung pada nilai kadar air (X). Nilai dari ΔE_v akan diketahui jika dilakukan suatu eksperimen yang melibatkan parameter yang ada di ruas kanan persamaan (5). Kebergantungan energi aktivasi terhadap kadar air dalam basis kering (X) dinormalisasi sebagai:

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{vb}} = f(X - X_b) \quad (6)$$

di mana f merupakan fungsi dari perbedaan kadar air, dan ΔE_{vb} merupakan energi aktivasi 'kesetimbangan' yang merupakan nilai maksimum dari ΔE_v dan diperoleh berdasarkan persamaan:

$$\Delta E_{vb} = -R T_b \ln(RH_b) \quad (7)$$

dengan T_b didefinisikan sebagai temperatur udara ambien (K).

Untuk material dengan jenis dan kadar air mula-mula yang sama, nilai dari $\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{vb}}$ (*relative activation energy*) dapat digunakan juga untuk kondisi pengeringan yang berbeda (Chen dan Xie, 1997; Chen dan Lin, 2005; Chen, 2008). Pada penelitian ini nilai $\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{vb}}$ yang digunakan berasal dari penelitian Putranto dan Chen (2014) di mana material yang dikeringkan berupa limbah lumpur dengan kadar awal mula-mula 3,5:

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{vb}} = 1,0728 \cdot \exp(-2,011(X - X_b)) \quad (8)$$

Pengembangan dari L-REA yang telah dijelaskan di atas akan menghasilkan *Spatial-REA* (S-REA) untuk kasus perpindahan massa multifasa yang tidak berkesetimbangan (*nonequilibrium multiphase mass-transfer model*). Pada pemodelan S-REA (Putranto dan Chen, 2014), laju pengeringan lokal di dalam struktur padatan material akan dideskripsikan sebagai:

$$I = h_{m, \text{in}} A_{\text{in}} (C_{v,s} - C_v) \quad (9)$$

di mana $C_{v,s}$ merupakan konsentrasi uap air pada permukaan padatan internal dan $C_{v,\text{sat}}$ adalah konsentrasi uap air jenuh internal yang dihubungkan dengan menggunakan REA melalui persamaan:

$$C_{v,s} = \exp\left(\frac{-\Delta E_v}{RT}\right) C_{v,\text{sat}}(T) \quad (10)$$

Model Matematika

Model matematika yang digunakan meliputi neraca massa tak tunak oksigen dan neraca panas dalam media berpori yang diperkenalkan oleh Sidhu dkk. (2007) dan digunakan oleh sejumlah peneliti lain (Moraga dkk. 2009). Sumber generasi panas terdiri atas panas yang timbul akibat oksidasi material selulosa dan panas yang berkaitan dengan pertumbuhan mikroorganisme yang diwakili oleh suku kedua dan ketiga pada ruas kanan neraca panas.

Diasumsikan juga terjadi kesetimbangan panas lokal (*local thermal equilibrium*) yang merupakan asumsi yang umum digunakan untuk media berpori dan unggun partikel tetap (Nield dan Bejan, 1992). Modifikasi pada neraca panas dilakukan dengan menambahkan suku I yang merupakan laju evaporasi atau kondensasi lokal yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Berikut adalah neraca panas dan neraca massa oksigen yang digunakan:

$$\begin{aligned} (\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q_c (1 - \varepsilon) A_c \rho_c C_{\text{ox}} \exp\left(\frac{-E_c}{RT}\right) + Q_b (1 - \varepsilon) \rho_b \rho_c \left(\frac{A_1 \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right)}{1 + A_2 \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right)} \right) \\ - I \Delta H_v (1 - \varepsilon) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\varepsilon \frac{\partial C_{\text{ox}}}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 C_{\text{ox}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{\text{ox}}}{\partial y^2} \right) - (1 - \varepsilon) A_c \rho_c C_{\text{ox}} \exp\left(\frac{-E_c}{RT}\right) \quad (12)$$

Konstanta perpindahan massa dan panas pada media berpori didefinisikan dalam persamaan yang melibatkan porositas tumpukan kompos (ε) dan diasumsikan tidak bergantung pada temperatur dan konsentrasi sebagai berikut:

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_{\text{udara}} + (1 - \varepsilon) k_c \quad (13)$$

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = \varepsilon \rho_{\text{udara}} C_{p,\text{udara}} + (1 - \varepsilon) \rho_c C_{p,c} \quad (14)$$

$$D_{\text{eff}} = \varepsilon D_{\text{udara},c} \quad (15)$$

Sementara itu neraca massa air dan uap air dirumuskan sebagai berikut:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial (C_s X)}{\partial t} = D_w (1 - \varepsilon) \left(\frac{\partial^2 (C_s X)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (C_s X)}{\partial y^2} \right) - I (1 - \varepsilon) \varepsilon_w \quad (16)$$

$$\varepsilon \frac{\partial C_v}{\partial t} = \varepsilon D_v \left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right) + I (1 - \varepsilon) \quad (17)$$

Besarnya konsentrasi padatan (C_s) dinyatakan dalam bentuk persamaan (Kar, 2008):

$$C_s = \frac{1 - \varepsilon}{\frac{1}{\rho_s} + \frac{\varepsilon}{\rho_w}} \quad (18)$$

Sedangkan variabel ε_w menyatakan fraksi permukaan yang dilingkupi oleh air dan dinyatakan dalam persamaan (Ousegui dkk., 2010):

$$\varepsilon_w = \frac{C_s X}{\rho_w} \quad (19)$$

Bagian bawah tumpukan kompos diasumsikan adiabatik dan impermeabel. Pertukaran panas dan difusi massa air dan uap air berlangsung secara konvektif, sedangkan konsentrasi oksigen pada bagian permukaan tumpukan kompos diasumsikan sama dengan konsentrasi oksigen udara luar sehingga berlaku syarat batas sebagai berikut:

$$y = 0 : \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \left. \frac{\partial C_{O_2}}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \left. \frac{\partial X}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \left. \frac{\partial C_s}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (20)$$

$$y = H : C_{O_2} = 0.272 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}; -k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a);$$

$$-D_w \frac{d(C_s X)}{dt} = hm(\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \varepsilon_w; -D_v \frac{dC_v}{dt} = hm(\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \varepsilon \quad (21)$$

Nilai dari D_v (difusivitas efektif uap air) diestimasi dari persamaan berikut (Bird dkk., 2002):

$$D_v = D_{v0} \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (22)$$

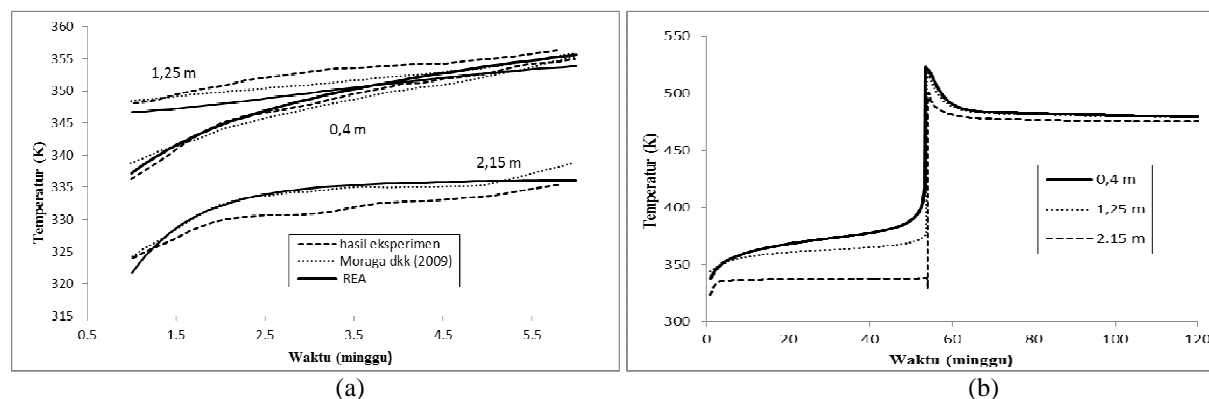
Nilai D_{v0} (difusivitas uap air) dan τ (*tortuosity*) diperoleh berdasarkan persamaan (Gimmi dkk., 1993):

$$D_{v0} = 2,09 \times 10^{-5} + 2,137 \times 10^{-7}(T - 273,15) \quad (23)$$

$$\tau = \varepsilon^{-1} \quad (24)$$

Nilai parameter yang digunakan dalam model matematika diambil dari penelitian Moraga dkk. (2009) dan Sidhu dkk. (2007).

Hasil dan Pembahasan



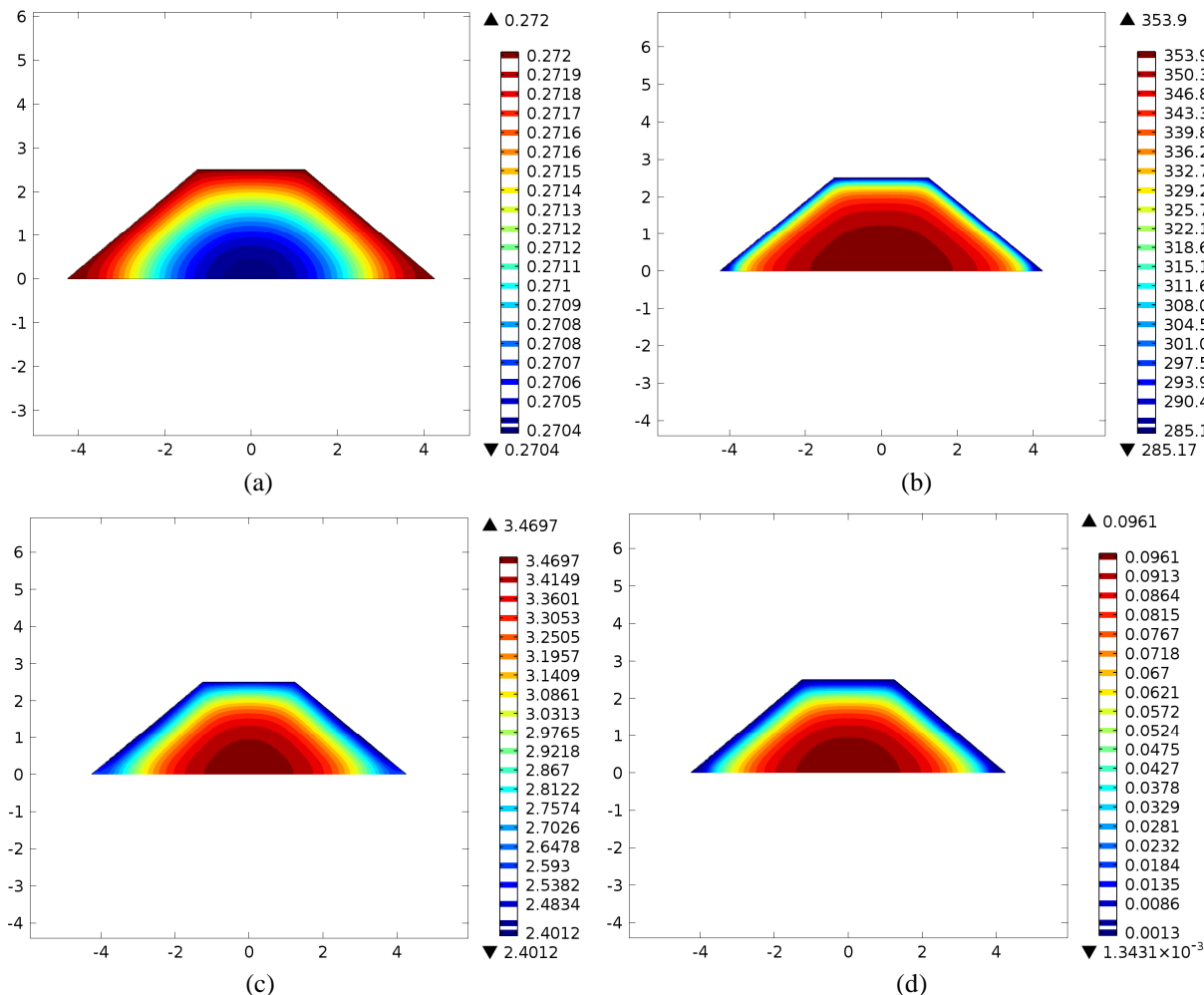
Gambar 2. Profil temperatur pada berbagai ketinggian dalam tumpukan kompos: (a) setelah 42 hari (b) setelah 950 hari

Data eksperimen dan hasil pemodelan dibandingkan pada Gambar 2a. Dapat dilihat bahwa hasil pemodelan dengan penerapan REA dapat mewakili hasil eksperimen, khususnya pada ketinggian 0,4 m. Untuk ketinggian 1,25 m dan 2,15 m, hasil pemodelan menunjukkan sedikit deviasi seperti hasil pemodelan yang dilakukan oleh Moraga dkk. (2009), namun menunjukkan kecenderungan yang sama dengan data eksperimen. Hasil pemodelan pada ketinggian 2,15 m dengan penerapan REA menunjukkan temperatur akhir setelah 42 hari yang lebih mendekati hasil eksperimen dibandingkan hasil pemodelan Moraga dkk. (2009).

Gambar 2b menunjukkan profil temperatur pada tumpukan kompos setelah 950 hari, di mana terlihat bahwa temperatur dalam tumpukan kompos akan meningkat seiring dengan berjalannya waktu dan mengalami lonjakan yang signifikan setelah pengomposan berlangsung sekitar 53 minggu. Fenomena ini terkait dengan teori *thermal explosion* yang digagas oleh Semenov dan Frank-Kamenetskii (1969) yang menggambarkan proses pembakaran (*combustion*) dimulai ketika panas yang lepas ke lingkungan tidak dapat mengimbangi panas yang dihasilkan oleh pemanasan internal yang terjadi di dalam material. Karakteristik fisik dari kompos akan berubah ketika mengalami *thermal explosion* dan tidak akan dapat digunakan sebagai pupuk. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengontrolan agar tidak terjadi *thermal explosion* pada tumpukan kompos yang juga dapat mengarah pada kebakaran lahan pengomposan.

Dengan penerapan REA pada model matematika yang digunakan, profil temperatur, konsentrasi oksigen, kadar air, dan konsentrasi uap air di dalam tumpukan kompos dapat diperoleh (Gambar 3). Profil konsentrasi oksigen (Gambar 3a) menunjukkan adanya pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme aerobik yang menyebabkan terkonsumsinya oksigen seiring dengan berjalannya waktu. Kadar air tertinggi (Gambar 3c) berada pada lapisan bawah dari tumpukan kompos yang dibuat impermeabel, sedangkan lapisan atas menunjukkan kadar air yang lebih rendah akibat adanya konveksi ke udara sekeliling. Kadar air yang rendah pada titik tertentu dalam tumpukan

kompos juga diakibatkan rendahnya temperatur pada titik tersebut (Gambar 3b) yang menyebabkan laju evaporasi rendah. Hal ini dapat dikonfirmasi juga melalui profil konsentrasi uap air yang sejalan dengan profil temperatur pada tumpukan kompos yang menunjukkan nilai tertinggi pada lapisan tengah-bawah tumpukan kompos. Dapat dilihat bahwa setelah 6 minggu waktu pengomposan, *thermal explosion* belum terjadi pada tumpukan kompos dengan konfigurasi trapezium tersebut.



Gambar 3. Profil pada tumpukan kompos setelah 6 minggu:
(a) konsentrasi oksigen [kg.m^{-3}] (b) temperatur [K] (c) kadar air [kg.kg^{-1}] (d) konsentrasi uap air [kg.m^{-3}]

Kesimpulan

Hasil pemodelan dengan penerapan *Reaction Engineering Approach* (REA) dapat mewakili data eksperimen yang diperoleh dengan baik dan dapat diterapkan untuk menggambarkan profil temperatur, konsentrasi oksigen, kadar air, dan konsentrasi uap air pada berbagai konfigurasi tumpukan kompos. Penggunaan REA dapat meningkatkan keakuratan hasil pemodelan fenomena *self-heating* pada tumpukan kompos untuk berbagai jenis dan kondisi parameter yang berbeda. REA memiliki keunggulan yaitu lebih sederhana dalam hal formulasi model. Nilai dari energi aktivasi kesetimbangan yang diperlukan dalam pemodelan dapat diperoleh dari satu eksperimen dengan material yang jenis dan kadar airnya sama sehingga jumlah eksperimen yang dibutuhkan jauh lebih sedikit.

Daftar Notasi

A = luas permukaan sampel [m^2]
 A_{in} = luas permukaan internal [m^2]
 A_1 = faktor pre-eksponensial untuk oksidasi [$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$]
 A_2 = faktor pre-eksponensial untuk hambatan pertumbuhan biomassa [$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$]

C_{ox} = konsentrasi oksigen di dalam tumpukan kompos [kg.m^{-3}]
 $C_{p,udara}$ = kapasitas panas spesifik udara [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 $C_{p,c}$ = kapasitas panas spesifik selulosa [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 C_s = konsentrasi padatan [kg.m^{-3}]
 C_v = konsentrasi uap air [kg.m^{-3}]

$C_{v,s}$ = konsentrasi uap permukaan internal [kg.m^{-3}]
 $C_{v,\text{sat}}$ = konsentrasi uap jenuh internal [kg.m^{-3}]
 D_{eff} = difusivitas massa efektif [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
 $D_{\text{udara},c}$ = difusivitas udara pada material selulosa [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
 D_v = difusivitas efektif uap air [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
 $D_{v,o}$ = difusivitas uap air [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
 D_w = difusivitas air [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
 E_c = energi aktivasi untuk oksidasi material selulosa [J.mol^{-1}]
 E_1 = energi aktivasi untuk pertumbuhan biomassa [J.mol^{-1}]
 E_2 = energi aktivasi untuk hambatan pertumbuhan biomassa [J.mol^{-1}]
 h = koefisien perpindahan panas konvektif [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
 h_m = koefisien perpindahan massa [m.s^{-1}]
 $h_{m,\text{in}}$ = koefisien perpindahan massa internal [m.s^{-1}]
 I = laju evaporasi lokal [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$]
 k_{udara} = konduktivitas panas udara [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 k_c = konduktivitas panas selulosa [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 k_{eff} = konduktivitas panas unggun [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 n = konstanta
 R = konstanta gas ideal [$\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$]
 RH = kelembaban relatif udara
 T = temperatur [K]

T_a = temperatur ambien [K]
 t = waktu [s]
 Q_b = *exothermicity* untuk oksidasi biomassa per kg selulosa kering [J.kg^{-1}]
 Q_c = *exothermicity* untuk oksidasi material selulosa [J.kg^{-1}]
 X = kadar air basis kering [kg.kg^{-1}]
 X_b = kadar air kesetimbangan basis kering [kg.kg^{-1}]
 (x,y) = koordinat [m]
 ΔE_v = energi aktivasi [J.mol^{-1}]
 $\Delta E_{v,b}$ = energi aktivasi kesetimbangan [J.mol^{-1}]
 ΔH_v = kalor penguapan air [J.kg^{-1}]
 ε = porositas
 ε_W = fraksi permukaan yang dilingkupi oleh air
 ρ = densitas [kg.m^{-3}]
 ρ_c = densitas selulosa [kg.m^{-3}]
 $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ = kapasitas panas efektif per unit volume unggun [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$]
 $\rho_{v,s}$ = konsentrasi uap air permukaan [kg.m^{-3}]
 $\rho_{v,b}$ = konsentrasi uap air udara ambien [kg.m^{-3}]
 $\rho_{v,\text{sat}}$ = konsentrasi uap air jenuh [kg.m^{-3}]
 ρ_{udara} = densitas udara [kg.m^{-3}]
 ρ_b = densitas biomassa [kg.m^{-3}]
 τ = *tortuosity*

Daftar Pustaka

- Bird, R.B., W.E. Stewart, dan E.N. Lightfoot, 2002, *Transport Phenomena 2nd international ed.*, Wiley, New York.
- Chen, X.D., 2008, The basics of a reaction engineering approach to modelling air drying of small droplets or thin layer materials, *Drying Technology*, 26, 627-639.
- Chen, X.D., dan G.Z. Xie., 1997, Fingerprints of the drying behavior of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering approach (REA) model, *Trans IChemE Part C: Food and Bioproducts Processing*, 75, 213-222.
- Chen, X.D., dan S.X.Q. Lin., 2005, Air drying of milk droplet under constant and time dependent conditions, *AIChE Journal*, 51, 1790-1799.
- Epstein, E., 2001, *Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management*, CRC Press, Boca Raton.
- Frank-Kamenetskii, D.A., 1969, *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*, Plenum Press, New York.
- Gimmi, T., H. Fuhler, B. Studer, dan A. Rasmuson, 1993, Transport of volatile chlorinated hydrocarbons in unsaturated aggregated media, *Water Air Soil Pollution*, 68, 291-305.
- Kar, S., 2008, Drying of porcine skin-theoretical investigations and experiments. Ph.D. Thesis, Monash University, Australia.
- Keey, R.B., 1992, *Drying of Loose and Particulate Materials*, Hemisphere, New York.
- Moraga, N. O., F. Corvalan, M. Escudey, A. Arias, dan C. E. Zambra., 2009, Unsteady 2D coupled heat and mass transfer in porous media with biological and chemical heat generations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5841-5848.
- Nield, D., dan A. Bejan, 1992, *Convection in Porous Media*, Springer, New York.
- Ousegui, A., C. Moresoli, M. Dostie, dan B. Marcos., 2010, Porous multiphase approach for baking process-explicit formulation of evaporation rate, *J. Food Eng.*, 100, 535-544.
- Putranto, A., dan X. D. Chen., 2014, A simple and effective model for modelling of convective drying of sewage sludge: the reaction engineering approach (REA), *Procedia Chemistry*, 9, 77-87.
- Putranto, A., dan X.D. Chen., 2013, Spatial reaction engineering approach as an alternative for nonequilibrium multiphase mass-transfer model for drying of food and biological materials, *American Institute of Chemical Engineers*, 59(1), 55-67.



- Putranto, A., X.D. Chen, dan PA. Webley., 2010, Modeling of drying of thick samples of mango and apple tissues using the reaction engineering approach (REA), *Drying Technology*, 29, 961-973.
- Rynk, R., 2000, Fires at composting facilities: causes and condition, *Biocycle*, 41 (1), 54-58.
- Sidhu, H. S., M. I. Nelson, dan X. D. Chen., 2007, A simple spatial model for self-heating compost piles, *Anziam Journal*, 48, C135-C150.



Lembar Tanya Jawab

Moderator: Yusuf Izidin (UPN “Veteran” Yogyakarta)

Notulen : Susanti Rina Nugraheni (UPN “Veteran” Yogyakarta)

1. Penanya : Nunik (ITS)

Pertanyaan :

- Apakah peneliti melakukan eksperimen dan mengambil data sendiri?
- Bagaimana cara mengukur konsentrasi uap air dalam tumpukan?
- Komposisi dalam kompos apa? Bagaimana reaksi kimia dan reaksi biologinya?

Jawaban :

- Tidak, data eksperimen diambil dari penelitian Moraga (2009) dimana variabel yang dipertimbangkan dalam penelitian tersebut adalah temperatur.
- Konsentrasi uap air tidak diukur di dalam penelitian, pengukuran cenderung sulit, jadi masih perlu dikonfirmasi.
- Pada tahap pertama pengomposan terjadi dekomposisi biologis oleh mikroorganisme mesofilik yang mendekomposisi material organik seperti karbohidrat, protein dan lemak setelah itu terjadi oksidasi selulosa oleh mikroorganisme termofilik.